

多个农民专业合作社和多个超市的网络博弈研究

李泉林, 张 玉, 鄂成国

(燕山大学经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 研究一个由多个农民专业合作社和多个超市所组成的农产品供应链网络, 建立了农产品供应链网络博弈模型, 给出了“农超对接”模式中农民专业合作社和超市之间的Myerson值的利润分配, 探讨了由多个农民专业合作社和多个超市所组成的农产品供应链网络下Myerson值的利润分配的稳定性. 结果表明, 农民专业合作社和超市在满足一定的供需条件下, Myerson值的利润分配在网络博弈的核心内部.

关键词: 农超对接; 农产品供应链管理; 网络博弈; Myerson值

中图分类号: TP224.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5781(2019)01-0029-17

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.01.003

Network game between multiple agricultural communes and multiple supermarkets

Li Quanlin, Zhang Yu, E Chengguo

(School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: This paper studies an agricultural supply chain network composed of multiple agricultural communes and multiple supermarkets, builds an agricultural supply chain network game model, and gives the profit allocation of Myerson value among the agricultural communes and supermarkets. Then the paper analyzes the stability of the profit allocation of Myerson value under the agricultural supply chain network composed of multiple agricultural communes and multiple supermarkets. The result shows that the profit allocation of Myerson value is in the core only when agricultural communes and supermarkets meet certain supply and demand conditions.

Key words: connecting agriculture with supermarket; agricultural products supply chain management; network games; Myerson value

1 引言

近20年来,“农超对接”模式已经成为我国农产品生产与销售的一种重要形式.为了解决改革开放后农产品生产方式分散问题(如联产承包责任制,以户为单位)以及农产品的价格波动大、损耗严重以及保质保鲜水平差等缺点,近年来零散农户不断加强合作并逐步形成了各种农民专业合作社.另一方面,随着城镇人口的增多,特别是近年来我国大规模的城市化,多数超市快速构建并通过发挥农产品保质保鲜、品种全、价格低、购买方便等特点,逐渐成为城乡居民购买生活用品的主要场所.因此,为了实现农产品生产与销售的综合一体化,“农超对接”不仅成为保障农产品供应链高效运行的重要形式,而且也是重点解决我国“三农”问题

收稿日期:2016-06-06; 修订日期:2017-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271187; 71471160; 71671158); 河北省高等学校创新团队领军人才培养计划资助项目(LJRC027).

的一项重大举措,其中农民专业合作社和超市之间的合作与利润分配机制研究是我国农业发展中一项重大的科学管理课题。

农超对接的主要节点是两端:农民专业合作社;超市。本文就是研究由农民专业合作社与超市组成的农产品供应链网络,并首次使用网络博弈的数学理论对其展开系统性的分析。在农民专业合作社与超市组成的农产品供应链网络中,可以归纳出如下几个重要方面:其一,合作的必要性^[1]。其原因包括单一企业的运作模式在向供应链管理运作模式转变^[2];单一农民专业合作社或单一超市不能适应市场波动;农民专业合作社和超市之间的供销活动不够灵活,等等。其二,可持续性的合作关系依赖于合理的利润分配机制^[3]。农民专业合作社和超市之间不断建立了交织的合作关系,多主体之间的稳定合作关注于合理的利润分配机制^[4],以往基于联盟的利润分配机制难以应对农产品供应链网络的合作关系结构。因此这就形成了一个“农超对接”中迫切需要解决的实际问题:如何构建一个由多个农民专业合作社与多个超市组成的农产品供应链网络,通过利润分配机制设计与稳定的网络连接关系构建来确保农民专业合作社和超市的最优个体利益、最优整体利益,其中关键的如何使得农民专业合作社与超市之间能够保持可持续合作的网络关系。其三,基于可持续合作关系与合理利润分配机制设计的农产品供应链网络博弈。多个农民专业合作社和多个超市之间的合作关系是一种网络的有向连接方式,同时这种连接方式所形成的网络结构表述了农民专业合作社与超市之间的稳定合作关系的基本基础与现实条件。因此研究这种多个农民专业合作社和多个超市的合作关系的网络构建与利润分配机制设计需要使用近十年来国际上发展起来的网络博弈理论与方法,而这种网络结构已经推广了通常的合作博弈理论范围(即仅关心利润分配机制)进入到特别关心网络结构与拓扑关系的设置。

多年来,国内外学者对“农超对接”模式下的农产品供应链开展了研究,将合作博弈理论运用到了农产品供应链的联盟合作^[1,5]、契约设计^[6]、决策机制^[7]等领域中。尤其,一些学者运用了通常的合作博弈理论中的讨价还价模型和Shapley值法,讨论了供应链的利润分配机制设计问题^[8,9]。此外,Leng等人^[4]基于合作博弈构建了不同主体(制造商,分销商和零售商)之间的特征函数,讨论了他们之间的合理利润分配机制。赵晓飞等人^[10]构建了基于非对称信息下农产品供应链联盟利润分配模型,研究了修正Shapley值的联盟利润分配机制。李泉林等人^[11]针对“农超对接”模式下配送中心与 n 个超市之间的库存共享的合作机制,给出并比较了Shapley值、加权Shapley值和Owen值下的利润分配机制设计。值得注意:在这些研究中,还没有文献考虑到农产品供应链的网络有向连接结构(Shapley值和Owen值等也只能解决基于联盟的局中人的利润分配)。农超企业之间的连接行为(有向多对多合作关系)对可持续合作关系与利润分配机制有较大的影响。这就推出了本文利用网络博弈研究在“农超对接”模式下农产品供应链网络的合作关系与利润分配机制设计。

网络博弈是建立在关系网络下具有连接行为的各个主体之间的一种新型博弈模型。合作博弈理论中联盟的概念只是强调局中人结成联盟,而并没有深究内部合作的方式;网络博弈中局中人通过合作关系建立连接从而形成网络,其分配机制还受到网络结构及其连接行为的多重影响。在网络博弈的分配机制方面:Myerson^[12]最早考虑了网络结构,并提出了一个新的基于网络结构的分配机制,即Myerson值。Jackson和Wolinsky^[13]扩展了Myerson的网络博弈模型,引入了基于合作的网络博弈,并依据网络结构定义了一个值函数来展开分析。Algaba等人^[14]研究了联盟稳定结构下的Myerson值的有用性质,并探讨了Myerson值与Shapley值的不同以及Myerson值所具有的诸多优势。不少学者进一步拓展了网络博弈的分配机制^[15-17],还将其运用到了天然气贸易国的合作策略上^[18]。在网络博弈的稳定性研究方面:Jackson和Wolinsky^[13]提出了成对稳定的概念,并讨论了成对稳定的网络。Jackson和van den Nouweland^[19]指出强稳定网络的存在性等价于博弈核心的存在性。在这些理论基础上,一些学者探讨了寡头垄断企业科研合作网络的稳定性^[20],社交网络的稳定性^[21],供应链价值网络的稳定性^[22]等。

网络博弈对于探讨网络结构下具有连接合作关系博弈局中人的利润分配及其稳定性具有一定优势。Nagayama^[18]和Fang^[23]在研究中都比较了网络博弈与通常的合作博弈的区别和优势,并表明:(1)网络博弈能够考虑局中人的合作方式,更有效地建立了有网络连接关系的局中人之间的合作机制;(2)通常的合作博

弈中Shapley值是基于联盟的分配, 而网络博弈中Myerson值是基于网络的边际分配, Myerson 值能够使局中人获得基于可持续合作关系的更满意的分配结果.

本文的学术贡献包括两个方面: 一是针对“农超对接”模式下多个农民专业合作社与多个超市组成的农产品供应链网络, 本文首次利用网络博弈研究了农民专业合作社与超市的Myerson 值的利润分配方式及其稳定性(若Myerson值的利润分配在网络博弈的核心内部, 则Myerson值的利润分配是稳定的)问题. 二是对于由多个农民专业合作社与多个超市组成网络博弈模型, 通过线性规划建立了值函数, 并采用Myerson值法的利润分配机制. 为了判断Myerson值的利润分配是否在博弈核心内部, 针对一个农民专业合作社和多个超市(或多个农民专业合作社和1个超市)组成的农产品供应链网络, 本文给出了Myerson值的利润分配在博弈核心内部的充分条件. 最后, 本文利用数值算例对所获得的主要结果进行了验证.

2 农产品供应链网络博弈模型

本节考虑一个由 m 个农民专业合作社和 n 个超市组成的农产品供应链网络, 首先利用网络博弈给出了这个农产品供应链网络博弈的基本元素, 并对这个网络进行了基本的参数设置和模型假设. 为了建立农民专业合作社与超市的可持续性合作关系, 从网络连接关系以及整体利润最大化的双重角度构建了一个值函数, 由此建立了一个由农民专业合作社和超市所组成的农产品供应链网络博弈模型.

2.1 网络博弈的基本元素

网络博弈是由局中人集合 N 和值函数 v 构成的一个二元组 (N, v) . 针对这个农产品供应链网络, 基本元素描述如下:

a) 局中人

设 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, $m \geq 1$ 为农民专业合作社集合, $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, $n \geq 1$ 为超市集合. 局中人集合 $N = R \cup M = \{R_1, R_2, \dots, R_m; M_1, M_2, \dots, M_n\}$, 其中 R_i 为第 i 个农民专业合作社, $i = 1, 2, \dots, m$; M_j 为第 j 个超市, $j = 1, 2, \dots, n$.

b) 网络组织

$g = \{R_i M_j \mid R_i \in N, M_j \in N\}$, 其中 $R_i M_j$ 表示农民专业合作社 R_i 与超市 M_j 有连接关系. 每个局中人都称为网络的节点. 对于任意子集 $S \subset N$, 有 $g|_S = \{R_i M_j \mid R_i M_j \in g, R_i \in S, M_j \in S\}$. 例如, 当 $S = \{R_1, R_2, M_1, M_2\}$ 时, 令 $g = \{R_1 M_1, R_1 M_2, R_2 M_1\}$, 则 R_1 与 M_1 有连接, R_1 与 M_2 有连接, R_2 与 M_1 连接; 但是 R_2 与 M_2 没有连接, 这表明农民专业合作社 R_2 与超市 M_2 没有合作关系, 从而农民专业合作社 R_2 与超市 M_2 不存在农产品的供需关系.

c) 值函数

在网络博弈中, 值函数 v 是刻画一个给定网络结构的最大值的函数, 类似于合作博弈的特征函数. 值函数定义为 $v: G(N) \rightarrow R$, 其中 $G(N)$ 是 N 上所有可能的网络的集合.

2.2 参数设置

由 m 个农民专业合作社和 n 个超市组成的农产品供应链网络的基本参数与有关符号设置如下: c_{R_i} 为农民专业合作社 R_i 的单位进货价格; e_{R_i} 为农民专业合作社 R_i 的单位售出价格, 也是超市的单位进货价格; p_{M_j} 为超市 M_j 的单位售出价格; $t_{R_i M_j}$ 为农民专业合作社 R_i 对超市 M_j 的单位运输价格; Q_{R_i} 为农民专业合作社 R_i 在一个周期内的库存量; $f_{R_i M_j}$ 为在一个周期内农民专业合作社 R_i 对超市 M_j 的运输量; D_{M_j} 为超市 M_j 在一个周期内的需求量.

2.3 模型假设

针对由 m 个农民专业合作社和 n 个超市组成的农产品供应链网络, 给出了这个系统的模型假设如下:

1) 合作供销机制: 农民专业合作社和超市之间以设立契约的形式建立供销关系, 农民专业合作社之间以

及超市之间也建立合作关系,其合作目的是寻求整个农产品供应链网络的利润最大化。

2)周期:假设这个网络的供销机制是在一个周期内变化的,例如,农产品的供货时间设为一个周期(例如,一般蔬菜一天一供应,其供销周期可以为一天)。

3)农民专业合作社:它能够对农产品进行初加工,包括对农产品进行保鲜、防腐与控温等基本处理.农民专业合作社为各个超市设有一定的库存,并假设农产品配送到超市的运输成本由农民专业合作社承担(包含农产品的控温、防腐等成本;运输车辆、人员的工资,等等)。

4)供货规则:一个农民专业合作社是否选择给一个超市供货取决于这个给定网络所确定的连接关系.若存在连接关系则供货,否则不供货。

5)信息共享机制:超市根据市场需求提前下单,农民专业合作社通过信息管理系统(例如ERP,物联网)获取超市订单,并且及时地向超市供应相应的农产品。

6)农民专业合作社具有盈利性:每个农民专业合作社对每一份销售出去的农产品都能盈利,即 $e_{R_i} - c_{R_i} - t_{R_i M_j} \geq 0$ 。

7)超市具有盈利性:每个超市对每一份销售出去的农产品都能盈利,即 $p_{M_j} - e_{R_i} \geq 0$ 。

进一步地,描述这个农产品供应链网络在一个周期内的合作供销机制,如下:在一个周期内,超市 M_j 根据自身需求量 D_{M_j} 通过信息管理系统向农民专业合作社发出订货需求;信息管理系统根据超市的订单情况,通过考虑各个农民专业合作社 R_i 的自身库存量 Q_{R_i} ,单位进货价格 c_{R_i} ,单位运输价格 $t_{R_i M_j}$ 以及超市的单位售出价格 p_{M_j} ,并能及时给出合理的运输量的配送方案 $\{f_{R_i M_j} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。于是,这就使得农民专业合作社能够快速地为超市提供相应的农产品。图1表示了这个农产品供应链中的农产品流通过程,其中农民专业合作社在这个图中用合作社来表示。

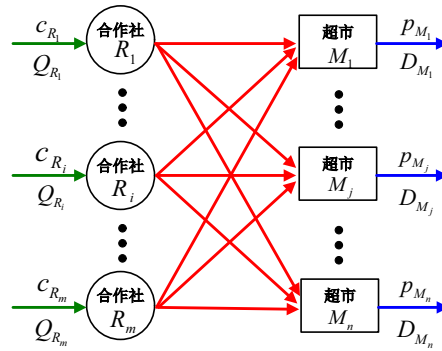


图1 由 m 个农民专业合作社和 n 个超市构成的农产品供应链网络

Fig. 1 An agricultural products supply chain network is composed of m agricultural communes and n supermarkets

2.4 值函数

在这个农产品供应链网络中,农民专业合作社与超市的值函数 v 依赖于农产品供应链的网络结构,也依赖于农民专业合作社的库存量 Q_{R_i} 和超市的需求量 D_{M_j} 。基于此,在任意一个子网络 $g|_S$ 中,考虑一个周期内的供销过程,

基于 m 个农民专业合作社和 n 个超市的合作供销机制,这个农产品供应链网络产生了以追求利润最大化为目的的最优运输量 $f_{R_i M_j} \geq 0$ 。对任意一个农民专业合作社 R_i 而言,其一周内的最大利润为农民专业合作社 R_i 配送给所有与 R_i 有连接关系的超市的运输量之和与单位运输收益 $e_{R_i} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}$ 的积,那么

(a)农民专业合作社的最大周期利润为

$$v_R(g|_S) = \max_{f_{R_i M_j}} \sum_{R_i M_j \in g|_S} (e_{R_i} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}) f_{R_i M_j},$$

同样,对任意一个超市 M_j ,其一周内的最大利润为与超市 R_i 有连接关系的农民专业合作社配送给超市 M_j 的

所有运输量之和与超市 M_j 单位运输收益 $p_{M_j} - e_{R_i}$ 的积, 那么

(b)超市的最大周期利润为

$$v_M(g|_S) = \text{Max}_{f_{R_i M_j}} \sum_{R_i M_j \in g|_S} (p_{M_j} - e_{R_i}) f_{R_i M_j},$$

(c)农产品供应链网络的最大周期利润为

$$v(g|_S) = \text{Max}_{f_{R_i M_j}} \sum_{R_i M_j \in g|_S} (p_{M_j} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}) f_{R_i M_j},$$

因此, 考虑农民专业合作社的库存量 Q_{R_i} 和超市的需求量 D_{M_j} , 可得到了一个优化的利润值函数 v , 即

$$v(g|_S) = \text{Max}_{f_{R_i M_j}} \sum_{R_i M_j \in g|_S} (p_{M_j} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}) f_{R_i M_j}, \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{R_i \in R} f_{R_i M_j} \leq D_{M_j}, & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{M_j \in M} f_{R_i M_j} \leq Q_{R_i}, & i = 1, 2, \dots, m \\ f_{R_i M_j} \geq 0, & i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\sum_{R_i \in R} f_{R_i M_j} \leq D_{M_j}$ 表示与超市 M_j 有连接的运输量之和小于等于超市 M_j 的需求量; $\sum_{M_j \in M} f_{R_i M_j} \leq Q_{R_i}$ 表示与农民专业合作社 R_i 有连接的运输量小于等于农民专业合作社 R_i 的库存量. 为了叙述方便, 令 $a_{R_i M_j} = p_{M_j} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}$ 表示单位运输收益.

针对这个农产品供应链网络, 分析一个数值算例并说明网络博弈在建模与分析上的一些优点.

例 1 在“农超对接”模式下, 考虑农产品供应链网络中两个农民专业合作社和两个超市之间的供销机制. 假设局中人子集 $S = \{R_1, R_2, M_1, M_2\}$; 农民专业合作社的库存量 $Q_{R_1} = 8, Q_{R_2} = 7$; 农产品的单位进货价格 $c_{R_1} = 2, c_{R_2} = 2.5$; 超市的需求量 $D_{M_1} = 5, D_{M_2} = 9$; 农产品的单位售出价格 $p_{M_1} = 9.5, p_{M_2} = 9.8$; 农民专业合作社对超市的单位运输价格 $t_{R_1 M_1} = t_{R_2 M_2} = 1, t_{R_1 M_2} = t_{R_2 M_1} = 2$. 于是, 考虑三种不同网络结构: ①网络 $g = \{R_1 M_1, R_1 M_2, R_2 M_1, R_2 M_2\}$, ②网络 $g = \{R_1 M_1, R_2 M_1, R_2 M_2\}$, ③网络 $g = \{R_1 M_1, R_1 M_2, R_2 M_1\}$.

根据式(1) ~ 式(2), 得到不同网络结构下的值函数分别为 $v(g_1|_S) = 88.2, v(g_2|_S) = 76.6, v(g_3|_S) = 51.4$. 由此看出: 在网络博弈中, 值函数不仅与局中人集合有关, 而且也依赖于网络中的连接关系. 基于此, 可以利用网络博弈来研究农产品供应链网络, 它不仅能够考虑农民专业合作社和超市之间的可持续合作关系(连接关系), 而且也可以构建在这种连接关系下的利润分配机制设计.

关于值函数 $v(g|_S)$ 有下列结论.

定理 1 农产品供应链网络博弈的值函数 $v(g|_S)$ 关于局中人集合是单调增的. 即, 对于集合 N 中任意子集 S' 和 S'' , 如果 $S'' \subset S'$, 那么 $v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S''})$.

证明 根据式(1), 定义满足约束条件(2)的值函数为

$$h(g|_S, f_{g|_S}) \equiv \sum_{R_i M_j \in g|_S} (p_{M_j} - c_{R_i} - t_{R_i M_j}) f_{R_i M_j}, \quad (3)$$

其中 $f_{g|_S}$ 表示在网络 $g|_S$ 下满足值函数约束条件(2)的运输形式. 所有 $f_{g|_S}$ 构成的集合用 $F_{g|_S}$ 表示, 即有 $f_{g|_S} \in F_{g|_S}$.

令 $\tilde{f}_{g|_S}$ 表示在网络 $g|_S$ 下的满足利润最优的运输形式, 则 $\tilde{f}_{g|_S} \in F_{g|_S}$. 根据式(3), 在给定网络 $g|_S$ 下的

最优运输形式的值函数可表示为

$$v(g|_S) = h(g|_S, \tilde{f}_{g|_S}), \quad (4)$$

那么根据式(4), 对于任意子集 $S'' \subset S' \subset N$, 子网络 $g|_{S'}$ 和 $g|_{S''}$ 的最优运输形式的值函数表示为

$$v(g|_{S'}) = h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S'}}), v(g|_{S''}) = h(g|_{S''}, \tilde{f}_{g|_{S''}}),$$

并且可得

$$\tilde{f}_{g|_{S'}} \in F_{g|_{S'}}, \tilde{f}_{g|_{S''}} \in F_{g|_{S''}}.$$

由于 $S'' \subset S'$, 所以 $\tilde{f}_{g|_{S''}} \in F_{g|_{S'}}$. 因此在网络 $g|_{S'}$ 中, $\tilde{f}_{g|_{S''}}$ 这种运输形式是可行的, 并根据式(3)~式(4)有

$$h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S''}}) = h(g|_{S''}, \tilde{f}_{g|_{S''}}).$$

又因为在网络 $g|_{S'}$ 下的所有运输形式中 $\tilde{f}_{g|_{S'}}$ 是最优运输形式, 所以可得

$$h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S'}}) \geq h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S''}}).$$

因此

$$v(g|_{S'}) = h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S'}}) \geq h(g|_{S'}, \tilde{f}_{g|_{S''}}) = h(g|_{S''}, \tilde{f}_{g|_{S''}}) = v(g|_{S''}).$$

这就表明, 农产品供应链网络博弈的值函数 $v(g|_S)$ 关于局中人集合是单调增的.

证毕.

值函数 $v(g|_S)$ 的单调增表明: 增加一个节点(一个农民专业合作社或一个超市)所形成的农产品供应链网络的最优利润是单调增的. 因此, 农产品供应链网络中各个成员没有脱离网络的动机^[23].

3 农产品供应链网络的利润分配

下面分析一个由 m 个农民专业合作社和 n 个超市组成的农产品供应链网络, 给出这个网络的Myerson值的利润分配方式, 并验证了Myerson值的利润分配是否在网络博弈的核心内. 如果Myerson值的利润分配在博弈的核心内, 那么Myerson值的利润分配是稳定的, 并且基于Myerson值利润分配的农产品供应链网络是稳定的^[23].

3.1 Myerson值的利润分配

Myerson对合作博弈中的Shapley值进行了拓展, 并引入了基于网络结构的一个新的分配机制: Myerson值, 用 Y^{MV} 来表示^[23]. 这里Myerson值为

$$Y_i^{MV}(v, g) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \left[\frac{|S|!(n - |S| - 1)!}{n!} \right] \{v(g|_{S \cup \{i\}}) - v(g|_S)\}, i \in N, \quad (5)$$

其中 $|S|$ 为集合 S 中的元素个数.

注意到Myerson值与Shapley值有相似的结构, 但是Shapley值是基于联盟的分配, 不考虑网络连接结构, 联盟中任意节点都可以获得分配. 在这个农产品供应链网络中, 农民专业合作社和超市之间的利润分配不仅与局中人有关而且还受到网络连接结构的影响. 因此推广Shapley值, Myerson值实现了基于网络连接关系的边际贡献的利润分配: 节点 i 增加到网络 $g|_S$ 中价值的改变为 $v(g|_{S \cup \{i\}}) - v(g|_S)$, Myerson值能够考虑到网络结构下节点(农民专业合作社或者超市)的合作连接关系, 并且根据连接关系进行了更公平合理的利润分配.

根据Myerson值, m 个农民专业合作社和 n 个超市的利润分配分别为

$$Y_{R_i}^{MV}(v, g) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{R_i\}} \left[\frac{|S|!((m+n) - |S| - 1)!}{(m+n)!} \right] \{v(g|_{S \cup \{R_i\}}) - v(g|_S)\}, R_i \in N, \quad (6)$$

$$Y_{M_j}^{MV}(v, g) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{M_j\}} \left[\frac{|S|!((m+n) - |S| - 1)!}{(m+n)!} \right] \{v(g|_{S \cup \{M_j\}}) - v(g|_S)\}, M_j \in N, \quad (7)$$

其中 $Y_{R_i}^{MV}(v, g)$ 表示分配给农民专业合作社 R_i 的合作利润; $Y_{M_j}^{MV}(v, g)$ 表示分配给超市 M_j 的合作利润. 在式(6)中, S 为不包含农民专业合作社 R_i 的集合; 在式(7)中, S 为不包含超市 M_j 的集合. 网络 g 在 Myerson 值下的利润分配用 $(g, Y^{MV}(g))$ 来表示.

3.2 Myerson 值的利润分配的稳定性分析

为了分析 Myerson 值的利润分配是否在博弈的核心内, 本节引入了合作博弈的凸性概念.

如果对于集合 N 中任意子集 S' 和 S'' 有 $S'' \subset S'$, 并且对任意节点 $i \notin S'$, 有

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}), \quad (8)$$

那么这个博弈称为凸博弈. 如果博弈 (N, v) 为凸博弈, 那么没有子网络会脱离 Myerson 值分配的完全网络. 于是这个博弈的核心非空, 并且 Myerson 值的利润分配 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部^[24].

在由 m ($m \geq 2$) 个农民专业合作社与 n ($n \geq 2$) 个超市所构成的农产品供应链网络中, 令 $\tilde{f}_{R_i M_j}$ 表示网络最优利润下农民专业合作社 R_i 配送给超市 M_j 的最优运输量. 下面的定理 2 给出了网络博弈核心非空的一个充分条件, 并且说明 $(g, Y^{MV}(g))$ 是博弈核心的一个点.

定理 2 若 $\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} = \sum_{M_j \in M} D_{M_j} = W$, 并且 $\tilde{f}_{R_i M_j} = (Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 则这个网络博弈的核心非空, 并且 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部.

证明 根据 Moulin^[24], 如果网络博弈 (N, v) 为凸博弈, 那么这个博弈的核心非空并且 Myerson 值的利润分配 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部. 因此, 在这里只需要证明博弈是凸的, 即证明不等式(8)是成立的. 为此考虑如下两种情况: ①节点 i 是任意农民专业合作社 R_k , ②节点 i 为任意一个超市 M_k .

①当节点 i 是任意农民专业合作社 R_k 时, 分析如下四种情况:

情况 I 若 $M \cap S' = \emptyset$ 且 $S'' \subset S'$, 则 $M \cap S'' = \emptyset$. 由于节点 i 为 R_k , 所以 $M \cap (S' \cup \{i\}) = \emptyset$ 且 $M \cap (S'' \cup \{i\}) = \emptyset$, 于是可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

情况 II 当 $M \cap S' \subset M$ 且 $M \cap S'' = \emptyset$ 时, 由于节点 i 为 R_k , 所以 $M \cap (S' \cup \{i\}) = M \cap S' \subset M$. 又由于 $\sum_{R_i \in S' \cup \{i\}} Q_{R_i} \geq \sum_{R_i \in S'} Q_{R_i}$, 所以可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0.$$

同时, 由于节点 i 为 R_k , 所以 $M \cap (S'' \cup \{i\}) = M \cap S'' = \emptyset$, 于是可得

$$v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

因此

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0 = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

情况 III 当 $M \cap S' = M$ 且 $M \cap S'' = M$ 时, 如果 $\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} = \sum_{M_j \in M} D_{M_j} = W$, 并且 $\tilde{f}_{R_i M_j} =$

$(Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 那么能够得到单位运输收益 $a_{R_i M_j}$ 为同一正数, 令其为 a , 并利用式(1)可得

$$\begin{aligned} v(g |_{S' \cup \{i\}}) - v(g |_{S'}) &= \sum_{R_k M_j \in g |_{S' \cup \{i\}}} a_{R_k M_j} \tilde{f}_{R_k M_j} = a \sum_{R_k M_j \in g |_{S' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_k} D_{M_j}}{W} \\ &= a \frac{\sum_{M_j \in M} Q_{R_k} D_{M_j}}{\sum_{M_j \in M} D_{M_j}} = a Q_{R_k}, \\ v(g |_{S'' \cup \{i\}}) - v(g |_{S''}) &= \sum_{R_k M_j \in g |_{S'' \cup \{i\}}} a_{R_k M_j} \tilde{f}_{R_k M_j} = a \sum_{R_k M_j \in g |_{S'' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_k} D_{M_j}}{W} \\ &= a \frac{\sum_{M_j \in M} Q_{R_k} D_{M_j}}{\sum_{M_j \in M} D_{M_j}} = a Q_{R_k}. \end{aligned}$$

于是

$$v(g |_{S' \cup \{i\}}) - v(g |_{S'}) = v(g |_{S'' \cup \{i\}}) - v(g |_{S''}).$$

情况IV 当 $M \cap S' \subset M$ 且 $M \cap S'' \subset M$ 时, 由 $S'' \subset S'$, 可得 $(M \cap S'') \subset (M \cap S')$. 如果 $\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} = \sum_{M_j \in M} D_{M_j} = W$, 并且 $\tilde{f}_{R_i M_j} = (Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 那么利用式(1)有

$$\begin{aligned} v(g |_{S' \cup \{i\}}) - v(g |_{S'}) &= \sum_{R_k M_j \in g |_{S' \cup \{i\}}} a_{R_k M_j} \tilde{f}_{R_k M_j} = a \sum_{R_k M_j \in g |_{S' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_k} D_{M_j}}{W} \\ &= a \frac{Q_{R_k} \sum_{M_j \in M \cap S'} D_{M_j}}{\sum_{M_j \in M} D_{M_j}}, \\ v(g |_{S'' \cup \{i\}}) - v(g |_{S''}) &= \sum_{R_k M_j \in g |_{S'' \cup \{i\}}} a_{R_k M_j} \tilde{f}_{R_k M_j} = a \sum_{R_k M_j \in g |_{S'' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_k} D_{M_j}}{W} \\ &= a \frac{Q_{R_k} \sum_{M_j \in M \cap S''} D_{M_j}}{\sum_{M_j \in M} D_{M_j}}. \end{aligned}$$

由 $S'' \subset S'$ 可得

$$\sum_{M_j \in M \cap S'} D_{M_j} > \sum_{M_j \in M \cap S''} D_{M_j},$$

因此

$$v(g |_{S' \cup \{i\}}) - v(g |_{S'}) > v(g |_{S'' \cup \{i\}}) - v(g |_{S''}).$$

②当节点 i 为任意一个超市 M_k 时, 分析如下四种情况:

情况I 若 $R \cap S' = \emptyset$ 且 $S'' \subset S'$, 则 $R \cap S'' = \emptyset$. 由于节点 i 为 M_k , 所以 $R \cap (S' \cup \{i\}) = \emptyset$ 且 $R \cap (S'' \cup \{i\}) = \emptyset$, 于是可得

$$v(g |_{S' \cup \{i\}}) - v(g |_{S'}) = v(g |_{S'' \cup \{i\}}) - v(g |_{S''}) = 0.$$

情况II 当 $R \cap S' \subset R$ 且 $R \cap S'' = \emptyset$ 时, 由于节点 i 为 M_k , 所以 $R \cap (S' \cup \{i\}) = R \cap S' \subset R$, 又由于 $\sum_{M_j \in S' \cup \{i\}} D_{M_j} \geq \sum_{M_j \in S'} D_{M_j}$, 所以可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0.$$

同时, 由于节点 i 为 M_k , 所以 $R \cap (S'' \cup \{i\}) = R \cap S'' = \emptyset$, 于是可得

$$v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

因此

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0 = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

情况III 当 $R \cap S' = R$ 且 $R \cap S'' = R$ 时, 如果 $\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} = \sum_{M_j \in M} D_{M_j} = W$, 并且 $\tilde{f}_{R_i M_j} = (Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 那么能够得到单位运输收益 $a_{R_i M_j}$ 为同一正数, 令其为 a , 并利用式(1)可得

$$\begin{aligned} v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) &= \sum_{R_i M_k \in g|_{S' \cup \{i\}}} a_{R_i M_k} \tilde{f}_{R_i M_k} = a \sum_{R_i M_k \in g|_{S' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_i} D_{M_k}}{W} \\ &= a \frac{\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} D_{M_k}}{\sum_{R_i \in R} D_{M_j}} = a D_{M_k}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) &= \sum_{R_i M_k \in g|_{S'' \cup \{i\}}} a_{R_i M_k} \tilde{f}_{R_i M_k} = a \sum_{R_i M_k \in g|_{S'' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_i} D_{M_k}}{W} \\ &= a \frac{\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} D_{M_k}}{\sum_{R_i \in R} D_{M_j}} = a D_{M_k}. \end{aligned}$$

于是

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

情况IV 当 $R \cap S' \subset R$ 且 $R \cap S'' \subset R$ 时, 由 $S'' \subset S'$, 得到 $(R \cap S'') \subset (R \cap S')$. 如果 $\sum_{R_i \in R} Q_{R_i} = \sum_{M_j \in M} D_{M_j} = W$, 并且 $\tilde{f}_{R_i M_j} = (Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 利用式(1)有

$$\begin{aligned} v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) &= \sum_{R_i M_k \in g|_{S' \cup \{i\}}} a_{R_i M_k} \tilde{f}_{R_i M_k} = a \sum_{R_i M_k \in g|_{S' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_i} D_{M_k}}{W} \\ &= a \frac{D_{M_k} \sum_{R_i \in R \cap S'} Q_{R_i}}{\sum_{R_i \in R} D_{M_j}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) &= \sum_{R_i M_k \in g|_{S'' \cup \{i\}}} a_{R_i M_k} \tilde{f}_{R_i M_k} = a \sum_{R_i M_k \in g|_{S'' \cup \{i\}}} \frac{Q_{R_i} D_{M_k}}{W} \\ &= a \frac{D_{M_k} \sum_{R_i \in R \cap S''} Q_{R_i}}{\sum_{R_i \in R} D_{M_j}}. \end{aligned}$$

由 $(R \cap S'') \subset (R \cap S')$ 可得

$$\sum_{R_i \in R \cap S'} Q_{R_i} > \sum_{R_i \in R \cap S''} Q_{R_i},$$

因此

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) > v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

这就表明, 网络博弈 (N, v) 是凸博弈, 因此 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部.

证毕.

在上述结论中, 如果农民专业合作社与超市有连接关系, 那么这个连接关系上的运输量 $\tilde{f}_{R_i M_j}$ 是满足库存量 Q_{R_i} 和需求 D_{M_j} 的最优运输量. 因此在这种运输机制下, 农民专业合作社和超市之间的运输量只随着供应和需求的改变而改变, 并且这种最优运输量下的单位收益机制相同, 保证了整个农产品供应链网络能够保持有效稳定的合作关系.

本节证明了一般的农产品供应链网络中Myerson值的利润分配方式可以是稳定的, 并给出了维持这种稳定的参数限制条件, 这也说明了这种限制条件的实际物理意义. 定理2表明农产品供应链网络需要设置合理的参数限制条件, 以使得这个农产品供应链网络博弈中的农民专业合作社和超市之间建立长期稳定的合作关系.

下面分析一个由3个农民专业合作社与2个超市所构成的农产品供应链网络.

例2 在由3个农民专业合作社和2个超市构成的农产品供应链网络中, 假设局中人子集 $S = \{R_1, R_2, R_3, M_1, M_2\}$, 网络结构 $g = \{R_1 M_1, R_1 M_2, R_2 M_1, R_2 M_2, R_3 M_1, R_3 M_2\}$; 农民专业合作社的库存量 $Q_{R_1} = 8, Q_{R_2} = 7, Q_{R_3} = 5$; 农产品的单位进货价格 $c_{R_1} = 2, c_{R_2} = 2.5, c_{R_3} = 2$; 超市的需求量 $D_{M_1} = 6, D_{M_2} = 9$; 农产品的单位售出价格 $p_{M_1} = 9.5, p_{M_2} = 9.8$; 农民专业合作社对超市的单位运输价格 $t_{R_1 M_1} = t_{R_2 M_2} = t_{R_3 M_2} = 1, t_{R_1 M_2} = t_{R_2 M_1} = t_{R_3 M_1} = 2$.

依据例2的参数计算得到各个农民专业合作社和超市之间的单位运输收益 $a_{R_i M_j}$, 由表1来表示.

表1 单位运输收益
Table 1 Unit transportation revenue

运输收益	$a_{R_1 M_1}$	$a_{R_1 M_2}$	$a_{R_2 M_1}$	$a_{R_2 M_2}$	$a_{R_3 M_1}$	$a_{R_3 M_2}$
取值	6.5	5.8	5	6.3	5.5	6.8

依据表1, 得到这个农产品供应链网络中各个子网络的利润值, 由表2来表示.

表2 子网络利润值
Table 2 Profit value of each subnetwork

集合	利润值	集合	利润值	集合	利润值
$\{R_1, M_1\}$	39	$\{R_1, R_2, M_2\}$	55.7	$\{R_3, M_1, M_2\}$	34
$\{R_1, M_2\}$	46.4	$\{R_1, R_3, M_1\}$	39	$\{R_1, R_2, M_1, M_2\}$	94.7
$\{R_2, M_1\}$	30	$\{R_1, R_3, M_2\}$	57.2	$\{R_1, R_3, M_1, M_2\}$	84.6
$\{R_2, M_2\}$	44.1	$\{R_2, R_3, M_1\}$	32.5	$\{R_2, R_3, M_1, M_2\}$	74.2
$\{R_3, M_1\}$	27.5	$\{R_2, R_3, M_2\}$	59.2	$\{R_1, R_2, R_3, M_1\}$	39
$\{R_3, M_2\}$	34	$\{R_1, M_1, M_2\}$	50.6	$\{R_1, R_2, R_3, M_2\}$	59.2
$\{R_1, R_2, M_1\}$	39	$\{R_2, M_1, M_2\}$	44.1	$\{R_1, R_2, R_3, M_1, M_2\}$	98.2

其他子网络的利润值均为0.

根据Myerson值的计算公式, 农民专业合作社和超市的利润分配分别为

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) = 17.985, Y_{R_2}^{MV}(v, g) = 13.527, Y_{R_3}^{MV}(v, g) = 9.235, Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 34.985, Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 22.468.$$

现在, 检验Myerson值的利润分配方案是否在博弈的核心内部:

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 52.97 > v(g|_{\{R_1, M_1\}}) = 39,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{40.453} < v(g |_{\{R_1, M_2\}}) = \mathbf{46.4},$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 48.512 > v(g |_{\{R_2, M_1\}}) = 30,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{35.995} < v(g |_{\{R_2, M_2\}}) = \mathbf{44.1},$$

$$Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 44.22 > v(g |_{\{R_3, M_1\}}) = 27.5,$$

$$Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{31.703} < v(g |_{\{R_3, M_2\}}) = \mathbf{34},$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 66.497 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_1\}}) = 39,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{53.98} < v(g |_{\{R_1, R_2, M_2\}}) = \mathbf{55.7},$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 62.205 > v(g |_{\{R_1, R_3, M_1\}}) = 39,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{49.688} < v(g |_{\{R_1, R_3, M_2\}}) = \mathbf{57.2},$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 57.747 > v(g |_{\{R_2, R_3, M_1\}}) = 32.5,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = \mathbf{40.938} < v(g |_{\{R_2, R_3, M_2\}}) = \mathbf{59.2},$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 75.438 > v(g |_{\{R_1, M_1, M_2\}}) = 50.6,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 70.98 > v(g |_{\{R_2, M_1, M_2\}}) = 44.1,$$

$$Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 66.688 > v(g |_{\{R_3, M_1, M_2\}}) = 34,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 88.965 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_1, M_2\}}) = 94.7,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 84.673 > v(g |_{\{R_1, R_3, M_1, M_2\}}) = 84.6,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 80.215 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_1, M_2\}}) = 74.2,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 75.732 > v(g |_{\{R_1, R_2, R_3, M_1\}}) = 39,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 63.215 > v(g |_{\{R_1, R_2, R_3, M_2\}}) = 59.2,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 98.2 = v(g |_{\{R_1, R_2, R_3, M_1, M_2\}}).$$

上述计算结果表明: 这个Myerson值的利润分配方案不在核心内部.

4 两个特殊网络的Myerson值的利润分配及其稳定性

定理2给出了一般网络结构下Myerson值的利润分配能够稳定的充分条件, 但是该充分条件有一些限制性. 而针对农产品供应链网络在一个特殊结构下的Myerson值的利润分配的稳定性, 下面分别给出更为简单的充分条件.

4.1 1个农民专业合作社和多个超市的网络

在由1个农民专业合作社和 n 个超市所构成的农产品供应链网络中, 农民专业合作社与超市之间的合作关系如图2所示.

定理3 若 $Q_{R_1} \geq \sum_{M_j \in N \setminus \{R_1\}} D_{M_j}$, $j = 1, 2, \dots, n$, 即农民专业合作社 R_1 的库存量 Q_{R_1} 大于或等于 n 个超市的需求量之和, 则这个网络博弈的核心非空, 并且 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部.

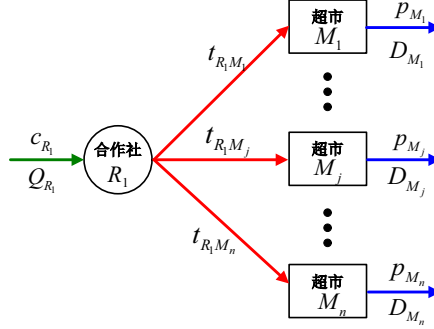


图2 由1个农民专业合作社和 n 个超市组成的农产品供应链网络

Fig. 2 An agricultural products supply chain network is composed of 1 agricultural commune and n supermarkets

证明 这个证明的关键之处是需要证明不等式(8)是成立的. 为此考虑如下两种情况: ①节点 i 是农民专业合作社 R_1 , ②节点 i 为任意一个超市 M_k .

①当节点 i 是农民专业合作社 R_1 时, 如果 $i \notin S'$ 且 $S'' \subset S'$, 那么 $R_1 \notin S'$ 且 $R_1 \notin S''$, 所以可得

$$v(g|_{S'}) = v(g|_{S''}) = 0,$$

由于 $S' \cup \{i\}$ 和 $S'' \cup \{i\}$ 都包含 R_1 , 所以根据定理1中的值函数的单调性, 可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}),$$

于是

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

②当节点 i 为任意一个超市 M_k 时, 分析如下三种情况:

情况I 若 $R_1 \notin S'$ 且 $S'' \subset S'$, 则 $R_1 \notin S''$. 由于节点 i 为 M_k , 所以 S' 、 $S' \cup \{i\}$ 、 S'' 和 $S'' \cup \{i\}$ 都不包含 R_1 , 于是可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

情况II 当 $R_1 \in S'$ 且 $R_1 \notin S''$ 时, 可以看出 S' 和 $S' \cup \{i\}$ 都包含 R_1 , 并且有 $\sum_{M_j \in S' \cup \{i\}} D_{M_j} \geq \sum_{M_j \in S'} D_{M_j}$. 于是可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0.$$

同时, 由于节点 i 为 M_k , 所以 S'' 和 $S'' \cup \{i\}$ 都不包含 R_1 , 于是可得

$$v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

因此

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0 = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

情况III 如果 $R_1 \in S''$ 且 $S'' \subset S'$, 则 $R_1 \in S'$. 依据条件 $Q_{R_1} \geq \sum_{M_j \in N \setminus \{R_1\}} D_{M_j}$, $j = 1, 2, \dots, n$ 并利用式(1)可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = (p_{M_k} - c_{R_1} - t_{R_1 M_k}) f_{R_1 M_k}.$$

对于上述三种情况, 都有

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

这就表明, 网络博弈 (N, v) 是凸博弈, 因此 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部. 证毕.

针对这样的农产品供应链网络, 如果一个农民专业合作社的库存量能够满足各个超市的需求量, 即供大于求或供求相等, 那么这个网络的Myerson值的利润分配在博弈的核心内, Myerson值的利润分配就是稳定的, 从而通过农民专业合作社的供应把控(最好是农民专业合作社和超市之间的供求相等)能够维持农民专业合作社与超市的稳定合作关系.

4.2 多个农民专业合作社和1个超市的网络

在由 m 个农民专业合作社和1个超市组成的农产品供应链网络中, 农民专业合作社和超市的合作关系如图3所示.

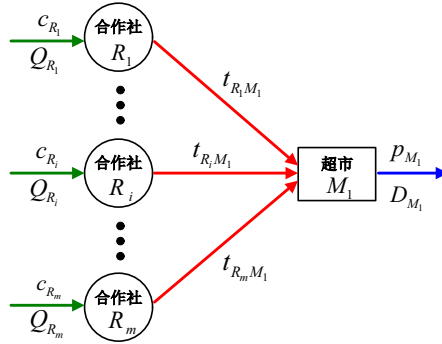


图 3 由 m 个农民专业合作社和1个超市组成的农产品供应链网络

Fig. 3 An agricultural products supply chain network is composed of m agricultural communes and 1 supermarket

定理 4 若 $D_{M_1} \geq \sum_{R_i \in N \setminus \{M_1\}} Q_{R_i}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 即超市 M_1 的需求量 D_{M_1} 大于或等于 m 个农民专业合作社的库存量之和, 则这个网络博弈的核心非空, 并且 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内.

证明 为了证明不等式(8)是成立的, 考虑如下两种情况: ①节点 i 是超市 M_1 , ②节点 i 为任意一个农民专业合作社 R_k .

①当节点 i 是超市 M_1 时, 如果 $i \notin S'$ 且 $S'' \subset S'$, 那么 $M_1 \notin S'$ 且 $M_1 \notin S''$, 所以可得

$$v(g|_{S'}) = v(g|_{S''}) = 0,$$

由于 $S' \cup \{i\}$ 和 $S'' \cup \{i\}$ 都包含 M_1 , 所以根据定理1中的值函数的单调性, 可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}),$$

于是

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

②当节点 i 为任意一个农民专业合作社 R_k 时, 分析如下三种情况:

情况I 若 $M_1 \notin S'$ 且 $S'' \subset S'$, $i = 1, 2, \dots, m$, 则 $M_1 \notin S''$. 由于节点 i 为 R_k , 所以 S' 、 $S' \cup \{i\}$ 、 S'' 和 $S'' \cup \{i\}$ 都不包含 M_1 , 于是可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

情况II 当 $M_1 \in S'$ 且 $M_1 \notin S''$ 时, 可以看出 S' 和 $S' \cup \{i\}$ 都包含 M_1 , 并且有 $\sum_{R_i \in S' \cup \{i\}} Q_{R_i} \geq \sum_{R_i \in S'} Q_{R_i}$. 于是可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0.$$

同时, 由于节点 i 为 R_k , 所以 S'' 和 $S'' \cup \{i\}$ 都不包含 M_1 , 于是可得

$$v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = 0.$$

因此

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq 0 = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

情况III 如果 $M_1 \in S''$ 且 $S'' \subset S'$, 则 $M_1 \in S'$. 依据条件 $D_{M_1} \geq \sum_{R_i \in N \setminus \{M_1\}} Q_{R_i}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 并利用式(1)可得

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) = v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}) = (p_{M_1} - c_{R_k} - t_{R_k M_1}) f_{R_k M_1}.$$

对于上述三种情况, 都有

$$v(g|_{S' \cup \{i\}}) - v(g|_{S'}) \geq v(g|_{S'' \cup \{i\}}) - v(g|_{S''}).$$

这就表明, 网络博弈 (N, v) 是凸博弈, 因此 $(g, Y^{MV}(g))$ 在博弈 (N, v) 的核心内部.

证毕.

针对这样的农产品供应链网络, 如果一个超市的需求量能够大于等于各个农民专业合作社的库存量之和, 即供不应求或供求相等, 那么这个网络的Myerson值的利润分配在博弈的核心内, Myerson值的利润分配是稳定的, 从而通过超市的需求把控(最好是农民专业合作社和超市之间的供求相等)能够维持农民专业合作社与超市的稳定合作关系.

5 数值算例

本节给出三个数值算例, 并验证了上述所获结果的正确性, 特别讨论了Myerson值的利润分配的稳定性.

例3表明了由2个农民专业合作社与2个超市所构成的农产品供应链网络中, Myerson值的利润分配是稳定的.

例3 在由2个农民专业合作社和2个超市构成的农产品供应链网络中, 假设局中人子集 $S = \{R_1, R_2, M_1, M_2\}$, 网络结构 $g = \{R_1 M_1, R_2 M_1, R_1 M_2, R_2 M_2\}$; 农民专业合作社的库存量 $Q_{R_1} = 8$, $Q_{R_2} = 7$; 超市的需求量 $D_{M_1} = 6$, $D_{M_2} = 9$; 单位运输收益 $a_{R_1 M_1} = a_{R_1 M_2} = a_{R_2 M_1} = a_{R_2 M_2} = 4$.

根据定理2, 网络中各个连接的运输量需满足 $\tilde{f}_{R_i M_j} = (Q_{R_i} D_{M_j}) / W$, 并依据上述参数取值得到的运输量为

$$\tilde{f}_{R_1 M_1} = (Q_{R_1} D_{M_1}) / W = 3.2, \quad \tilde{f}_{R_1 M_2} = (Q_{R_1} D_{M_2}) / W = 4.8,$$

$$\tilde{f}_{R_2 M_1} = (Q_{R_2} D_{M_1}) / W = 2.8, \quad \tilde{f}_{R_2 M_2} = (Q_{R_2} D_{M_2}) / W = 4.2.$$

根据值函数和Myerson值的公式, 得到农民专业合作社和超市的利润分配分别为

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) = 16, Y_{R_2}^{MV}(v, g) = 14, Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 12, Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 18.$$

进一步地, 检验这个Myerson值的利润分配方案是否在合作博弈的核心内部, 如下

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 43.133 > v(g|_{\{R_1, M_1\}}) = 32.5,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 52.5 > v(g|_{\{R_1, M_2\}}) = 46.4,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 35.7 > v(g|_{\{R_2, M_1\}}) = 25,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 48.933 > v(g|_{\{R_2, M_2\}}) = 44.1,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 59.05 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_1\}}) = 44.9,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 72.283 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_2\}}) = 55.7,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 68.417 > v(g |_{\{R_1, M_1, M_2\}}) = 49.9,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 64.85 > v(g |_{\{R_2, M_1, M_2\}}) = 44.1,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 88.2 = v(g |_{\{R_1, R_2, M_1, M_2\}}).$$

上述计算结果表明: 这个Myerson值的利润分配在核心内部。

例4给出了在由1个农民专业合作社与3个超市所构成的农产品供应链网络中, Myerson 值的利润分配是稳定的。

例 4 在由1个农民专业合作社和3个超市构成的农产品供应链网络中, 假设局中人子集 $S = \{R_1, M_1, M_2, M_3\}$, 网络结构 $g = \{R_1 M_1, R_1 M_2, R_1 M_3\}$; 其中农民专业合作社的库存量 $Q_{R_1} = 8, Q_{R_2} = 7$; 进货价格 $c_{R_1} = 2$; 超市的需求量 $D_{M_1} = 5, D_{M_2} = 9, D_{M_3} = 6$; 产售价品 $p_{M_1} = p_{M_2} = 6, p_{M_3} = 6.5$; 农民专业合作社对超市的单位运输成本 $t_{R_1 M_1} = t_{R_1 M_2} = t_{R_1 M_3} = 1$ 。

依据上述参数取值计算可得网络中各个连接的运输量 $f_{R_i M_j}$ 及单位运输收益 $a_{R_i M_j}$ 为

$$f_{R_1 M_1} = 5, f_{R_1 M_2} = 8, f_{R_1 M_3} = 6,$$

$$a_{R_1 M_1} = 3, a_{R_1 M_2} = 3, a_{R_1 M_3} = 3.5.$$

根据值函数和Myerson值的公式, 得到各个农民专业合作社和各个超市的利润分配为

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) = 30, Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 7.5, Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 12, Y_{M_3}^{MV}(v, g) = 10.5.$$

进一步地, 检验这个Myerson值的利润分配方案是否在合作博弈的核心内部, 如下

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 37.5 > v(g |_{\{R_1, M_1\}}) = 15,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 42 > v(g |_{\{R_1, M_2\}}) = 24,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_3}^{MV}(v, g) = 40.5 > v(g |_{\{R_1, M_3\}}) = 21,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 49.5 > v(g |_{\{R_1, M_1, M_2\}}) = 39,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_3}^{MV}(v, g) = 48 > v(g |_{\{R_1, M_1, M_3\}}) = 36,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_3}^{MV}(v, g) = 52.5 > v(g |_{\{R_1, M_2, M_3\}}) = 45,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_2}^{MV}(v, g) = 60 = v(g |_{\{R_1, R_2, M_1, M_2\}}).$$

上述计算结果表明: 这个Myerson值的利润分配在核心内部。

例5给出了在由3个农民专业合作社与1个超市所构成的农产品供应链网络中, Myerson 值的利润分配是稳定的。

例 5 在由3个农民专业合作社和1个超市构成的农产品供应链网络中, 假设局中人子集 $S = \{R_1, R_2, R_3, M_1\}$, 网络结构 $g = \{R_1 M_1, R_2 M_1, R_3 M_1\}$; 其中各个农民专业合作社的库存量分别为 $Q_{R_1} = 8, Q_{R_2} = 6, Q_{R_3} = 5$; 农产品的单位进价为 $c_{R_1} = 8, c_{R_2} = 6, c_{R_3} = 5$; 超市的需求量为 $D_{M_1} = 20$; 农产品的售价为 $p_{M_1} = 8$; 农民专业合作社对超市的单位运输成本为 $t_{R_1 M_1} = t_{R_2 M_1} = 1, t_{R_3 M_1} = 1$ 。

依据上述参数取值计算可得网络中各个连接的运输量 $f_{R_i M_j}$ 及单位运输收益 $a_{R_i M_j}$ 为

$$f_{R_1 M_1} = 8, f_{R_2 M_1} = 6, f_{R_3 M_1} = 5,$$

$$a_{R_1 M_1} = 5, a_{R_2 M_1} = 4.5, a_{R_1 M_3} = 4.5.$$

根据值函数和Myerson值,得到各个农民专业合作社和各个超市的利润分配为

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) = 20, Y_{R_2}^{MV}(v, g) = 13.5, Y_{R_3}^{MV}(v, g) = 12.25, Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 44.75.$$

进一步地,检验这个Myerson值的利润分配方案是否在合作博弈的核心内部,如下

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 64.75 > v(g |_{\{R_1, M_1\}}) = 40,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 58.25 > v(g |_{\{R_2, M_1\}}) = 27,$$

$$Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 56 > v(g |_{\{R_3, M_1\}}) = 22.5,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 78.25 > v(g |_{\{R_1, R_2, M_1\}}) = 44.9,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 76 > v(g |_{\{R_1, R_3, M_1\}}) = 62.5,$$

$$Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 69.5 > v(g |_{\{R_2, R_3, M_1\}}) = 49.5,$$

$$Y_{R_1}^{MV}(v, g) + Y_{R_2}^{MV}(v, g) + Y_{R_3}^{MV}(v, g) + Y_{M_1}^{MV}(v, g) = 90.5 = v(g |_{\{R_1, R_2, R_3, M_1\}}).$$

上述计算结果表明:这个Myerson值的利润分配在核心内部.

6 结束语

本文利用网络博弈研究了我国“农超对接”模式下一个由多个农民专业合作社和多个超市所组成的农产品供应链网络,对不同的网络结构形式采用Myerson值分配了农民专业合作社与超市的利润并讨论了其稳定性.未来的研究工作中可以考虑讨论更大规模更复杂的农产品供应链网络,例如,考虑农民专业合作社和超市的主从关系;在农民专业合作社与超市的网络中引入中间商(例如配送中心与分销中心)等等.本文的研究方法对于推动我国“农超对接”模式的健康发展具有重要的理论意义和实际应用价值,也为我国“农超对接”模式下的农产品供应链管理研究提供重要的理论依据与技术支持.

参考文献:

- [1] 刘磊,乔忠,刘畅.“农超对接”模式中的合作博弈问题研究.管理工程学报,2012,26(4): 100–106.
Liu L, Qiao Z, Liu C. Cooperative game in the model of connecting agriculture with supermarkets. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2012, 26(4): 100–106. (in Chinese)
- [2] 王利,张有志,周媛.三级供应链合作利润博弈模型及经济性分析.运筹与管理,2009,18(4): 67–72.
Wang L, Zhang Y Z, Zhou Y. Study on game model and economic quantity of cooperative profit in three-stage supply chain. Operations Research and Management Science, 2009, 18(4): 67–72. (in Chinese)
- [3] 张倩,李崇光.农产品物流发展的供应链管理模式及对策.软科学,2008,22(1): 91–93.
Zhang Q, Li C G. The supply chain management model and countermeasures of agricultural products logistics' development. Soft Science, 2008, 22(1): 91–93. (in Chinese)
- [4] Leng M, Parlar M. Allocation of cost savings in a three-level supply chain with demand information sharing: A cooperative-game approach. Operations Research, 2009, 57(1): 200–213.
- [5] Jang W, Klein C M. Supply chain models for small agricultural enterprises. Annals of Operations Research, 2011, 190(1): 359–374.

- [6] 曹文彬, 左慧慧. 基于博弈模型的农超对接契约设计与选择策略——以“合作社+超市”模式为例. 软科学, 2015, 29(3): 64–69
Cao W B, Zuo H H. Cotract design and selection strategy based on the game model. Soft Science, 2015, 29(3): 64–69. (in Chinese)
- [7] Netessine S. Supply Chain Structures on the Internet: Marketing Operations Coordination. New York: Doctoral Dissertation, University of Rochester, 2000.
- [8] Nagarajan M, Sosis G. Game-theoretic analysis of cooperation among supply chain agents: Review and extension. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 719–745.
- [9] 李泉林, 黄亚静, 鄂成国. 农超对接下农业合作社联盟的排队网络型合作博弈研究. 系统科学与数学, 2016, 36(11): 1972–1985.
Li Q L, Huang Y J, E C G. Research on cooperative games of queueing networks for agricultural cooperative alliances under the mode of connecting agriculture with supermarkets. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(11): 1972–1985. (in Chinese)
- [10] 赵晓飞, 李崇光. 农产品供应链联盟的利益分配模型与策略研究. 软科学, 2008, 22(5): 90–110.
Zhao X F, Li C G. Research on profit distribution model and tactics for the agro-product supplu chian alliance. Soft Science, 2008, 22(5): 90–110. (in Chinese)
- [11] 李泉林, 黄亚静, 鄂成国. “农超对接”下配送中心与n个超市的合作机制研究. 运筹与管理, 2017, 26(3): 27–35.
Li Q L, Huang Y J, E C G. Operations research and management science. Operations Research and Management Science, 2017, 26(3): 27–35. (in Chinese)
- [12] Myerson R. Graphs and cooperation in games. Mathematics of Operations Research, 1977, 2(3): 225–229.
- [13] Jackson M O, Wolinsky J. A strategic model of social and economic networks. Journal of Economic Theory, 1996, 71(1): 44–74.
- [14] Algaba E, Bilbao J M, Borm P, López J J. The myerson value for union stable structures. Mathematical Methods of Operations Research, 2001, 54(3): 359–371.
- [15] Jackson M O. Allocation rules for network games. Games and Economic Behavior, 2005, 51(1): 128–154.
- [16] Van den Nouweland A, Slikker M. An axiomatic characterization of the position value for network situations. Mathematical Social Sciences, 2012, 64(3): 266–271.
- [17] Borkotokey S, Kumarb R, Sarangic S. A solution concept for network games: The role of multilateral interactions. European Journal of Operational Research, 2015, 243(3): 912–920.
- [18] Nagayama D, Horita M. A network game analysis of strategic interactions in the international trade of russian natural gas through Ukraine and Belarus. Energy Economics, 2014, 43(2): 89–101.
- [19] Jackson M O, Van den Nouweland. Strongly stable networks. Games and Economic Behavior, 2005, 51(2): 420–444.
- [20] Goyal S, Joshi S. Networks of collaboration in oligopoly. Games and Economic Behavior, 2003, 43(1): 57–85.
- [21] Narayanam R, Narahari Y. Topologies of strategically formed social networks based on a generic value function-allocation rule model. Social Network, 2011, 33(1): 56–69.
- [22] 杨文博, 高政利. 供应链价值网络合作博弈核心解的非空性. 系统工程, 2009, 27(11): 78–81.
Yang W B, Gao Z L. Non-empty property of the core in cooperative games of the supply chian value network. System Engineering, 2009, 27(11): 78–81. (in Chinese)
- [23] Fang X, Cho S H. Stability and endogenous formation of inventory transshipment networks. Operations Research, 2014, 62(6): 1316–1334.
- [24] Moulin H. Axioms of Cooperative Decision Making. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

作者简介:

李泉林 (1964—), 男, 河北人, 博士, 博士生导师, 教授, 研究方向: 随机模型、计算机网络、排队论、博弈论、物流与供应链管理、物联网, Email: liquanlin@tsinghua.edu.cn;

张 玉 (1989—), 女, 河北人, 硕士生, 研究方向: 博弈论、物流与供应链管理, Email: zhyuyu4848@sina.com;

鄂成国 (1980—), 男, 黑龙江人, 博士生, 研究方向: 博弈论、物流与供应链管理、排队论及其应用; Email: echeng-guo@126.com.